

INTERFEROMETRIC MEASUREMENT OF OPTICAL SIGNAL IN TURBULENCE

Soňa Kovařová

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xkova11@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Lucie Hudcová

E-mail: hudcova@feec.vutbr.cz

Abstract: This project deals with the measuring of the impact of atmospheric turbulence on laser beam used in wireless optical communication. The method is based on interferometry with using of Michelson interferometer. Mathematical apparatus comes from Kolmogorov's cascade theory and statistical analysis.

Keywords: Michelson interferometer, laser beam, atmospheric turbulence, index-of-refraction structure parameter, FSO/RF

1 ÚVOD

Degradácia optického zväzku vplyvom atmosférických turbulencií predstavuje závažný problém v bezdrôtových optických komunikačných systémoch. V súčasnosti maximálne prenosové rýchlosti plne optických systémov dosahujú 1,72 Tb/s na 10,45 km trase (pre uptime 99,9 % potrebná RF hybridizácia systémov) [1]. Nové terabitové komunikačné systémy využívajú fázové klúčovanie (PSK - Phase Shift Keying) pre kódovanie prenášanej informácie. Preto aj malé výkyvy vo fáze môžu mať fatálny dopad na spoľahlivosť a presnosť systému. Pre eliminovanie týchto turbulentných mechanizmov je potrebné vedieť ich správne kvantifikovať. Táto práca je motivovaná predovšetkým nedostatkom vyhodnocovacích metód v tejto problematike, sleduje vplyv atmosférickej turbulencie na interferenčný obrazec a štatisticky vyjadruje jeho charakter.

2 ATMOSFÉRICKÉ TURBULENCIE

Atmosféra je nehomogénny a nestacionárny dynamický systém. Dochádza tu k absorpcii, prípadne rozptylu energie optického zväzku vodnými parami a aerosolmi [2]. Všetky tieto javy spôsobujú frekvenčnú závislosť priepustnosti atmosféry.

Atmosférická turbulencia je nelineárny stochastický jav spôsobený rýchlou zmenou teplôt na rozhraní zemského povrchu a atmosféry alebo vplyvom mechanického pôsobenia vzduchu. Masy vzduchu s rozdielnymi teplotami a indexom lomu sa o seba trú a postupne trhajú na menšie. Vytvárajú tzv. turbulentné cely s vnútorným priemerom l_0 a vonkajším priemerom L_0 . Väčšie víry sa rozpadávajú rýchlejšie, dominuje v nich energia mechanického pohybu. Doba rozpadu malých vírov je kratšia a väčšiu úlohu v nich zohrávajú viskózne sily. Na najnižšej úrovni víry zanikajú a zbytková energia sa premení na teplo. Vtedy dosahuje Reynoldsovo číslo radovo jednotky a veľkosť príslušného víru určuje veľkosť turbulentnej mikrocely. Vo výsledku dochádza k redistribúcii indexu lomu v čase a priestore. Tento jav sa označuje pojmom energetická kaskáda. Na problematiku turbulencií ju aplikoval Kolmogorov [3]. Keď laserový zväzok prechádza takýmto prostredím, je nutné počítat s jeho energetickými a tvarovými zmenami.

3 URČENIE MIERY TURBULENCIE POMOCOU TEPLOTY

Kombináciou Kolmogorovovej teórie turbulencií a Rytovovej variancie bola vykonaná štatistická analýza indexu lomu v turbulentnom prostredí generovanom v laboratórnych podmienkach. V turbulentnej komore boli vytvorené slabé turbulencie pomocou teráriového výhrevného pásu (pás je možné nahriať na $\sim 40^\circ\text{C}$). V prvej časti experimentu bolo pomocou sond PT1000 vykonané presné meranie teplôt v 7 bodoch pozdĺž 104 cm dlhej turbulentnej komory. V každom bode boli umiestnené 2 PT sondy (V bode A_1 a A_2 , vzdialených od seba 0,8 mm). Predpokladáme, že obe sondy boli umiestnené vnútri turbulentnej mikrocely. Teploty boli merané po dobu 7 minút v každom bode s frekvenciou 8 meraní za sekundu. Z dvojíc nameraných teplôt v každom bode boli vypočítané indexy lomu podľa vzťahu:

$$n(R) = 1 + 79 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P(A)}{T(A)}, \quad (1)$$

kde $P(A)$ je atmosférický tlak v milibaroch a $T(A)$ je teplota v danom bode v Kelvinoch.

Z týchto hodnôt bola určená štruktúrna funkcia $D_n(A_1, A_2)$:

$$D_n(A_1, A_2) = \left\langle [n(A_1) - n(A_2)]^2 \right\rangle. \quad (2)$$

Štruktúrna funkcia $D_n(R)$ z Kolmogorovovej analýzy je vo svojej podstate výberovým rozptylom indexov lomov $D_n(A_1, A_2)$:

$$D_n(R) = \begin{cases} C_n^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_n^2 l_0^{-4/3} R^2, & R \ll l_0 \end{cases}, \quad (3)$$

kde C_n^2 je štruktúrny parameter indexu lomu, R je vzdialenosť bodov merania $|A_1 - A_2| = 0,8$ mm. L_0 je veľkosť makrocely a l_0 je veľkosť mikrocely (v blízkosti zemského povrchu dosahuje hodnoty 1 až 10 mm). Nasleduje výpočet štruktúrneho parametra indexu lomu C_n^2 odvodený z kaskádneho energetického princípu [4]:

$$C_n^2 = \frac{D_n(R)}{R^{\frac{2}{3}}}. \quad (4)$$

Výsledky potvrdili, že C_n^2 je rastie s intenzitou turbulencií. Výsledky uvedené na obrázku 1 vľavo.

4 URČENIE MIERY TURBULENCIE LOKÁLNEHO ZDROJA POMOCOU NAMERANÉHO OPTICKÉHO VÝKONU

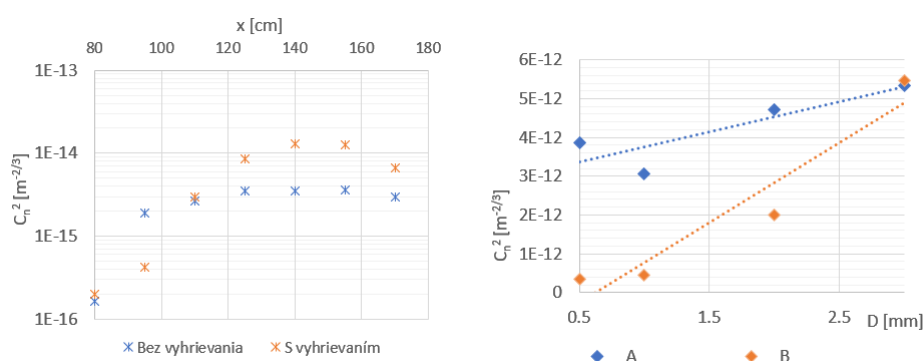
Lokálnym zdrojom turbulencií v experimente bola sviečka umiestnená v trase laserového lúča. Optický výkon bol detekovaný pomocou fotodiódového detektora Ophir Vega PD300-3W. Tento detektor umožňuje integrálne vyčítanie optického výkonu cez celú plochu prijímacej apertúry. Pre zaznamenanie malých zmien vo výkone bolo vykonané meranie so štrbinami o troch veľkostiach (1, 2 a 3 mm). Optický výkon bol meraný so sviečkou umiestnenou v dvoch polohách: 20 cm (A) a 200 cm (B) od detektora. Vďaka vymedzeniu prijímacej apertúry štrbinou je možné vypočítať hodnotu optickej intenzity odvodením zo vzťahu 5, ktorý udáva faktor priemerovania apertúry:

$$f_{AA} = \frac{\sigma_P^2}{\sigma_I^2} = (1 + 1,062 \cdot \frac{k \cdot D^2}{4L})^{-\frac{7}{6}}. \quad (5)$$

D predstavuje v tomto vzťahu priemer prijímacej apertúry, k je vlnové číslo a L je dĺžka trasy lúča. Pre f_{AA} platí $0 < f_{AA} < 1$. Bez vymedzenia malej plochy, cez ktorú môže svetlo lasera prenikat' k detektoru, by sme zmenu optického výkonu nezaznamenali, pretože jej celková hodnota je v čase konštantná. Pre analýzu nameraných dát bola použitá Rytovova variancia [3], ktorá odvodzuje vzťah pre výpočet C_n^2 :

$$C_n^2 = \frac{\sigma_{I,rel}^2}{K \cdot k^{\frac{7}{6}} \cdot L^{\frac{11}{6}}}, \quad (6)$$

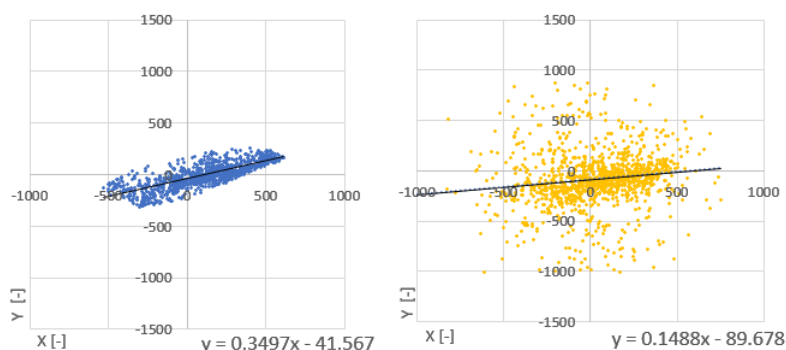
kde K je parameter charakteristický pre rovinnú vlnu a jeho hodnota je 1,23



Obrázek 1: Rozloženie hodnôt C_n^2 pozdĺž trasy laserového zväzku (vľavo). x vyjadruje vzdialenosť od zdroja žiarenia. Závislosť štruktúrneho parametru indexu lomu od veľkosti štrbiny pre $\lambda = 631,5$ nm a $L = 5,38$ m pre dve polohy zdroja turbulencií A a B (vpravo). Popis týchto meracích polôh zmienený v odseku 4.

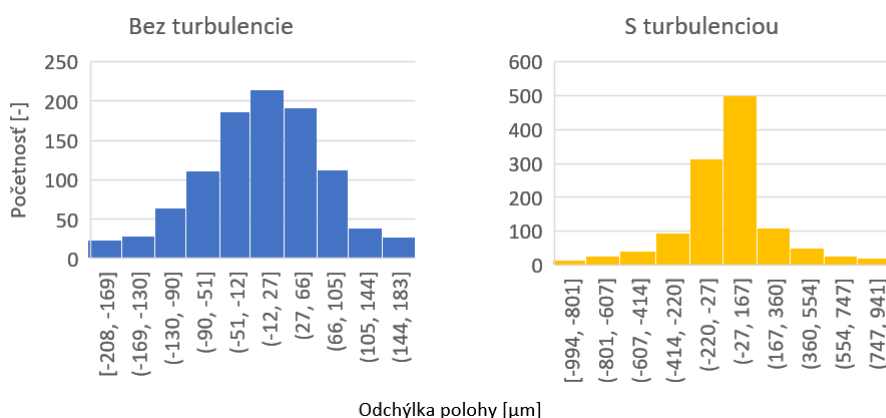
5 URČENIE MIERY TURBULENCIE POMOCOU OPTICKÉHO VÝKONU DETEKOVANÉHO CCD KAMEROU S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM

Pre túto časť experimentu bol zostavený Michelsonov interferometer ktorého meracie rameno prechádzalo turbulentnou komorou. Na výstupe interferometra bola umiestnená CCD kamera Spiricon SP620U. Turbulencie boli opäť generované bodovým zdrojom (sviečka). V prvej fáze bol pozorovný drift interferenčného maxima prvého rádu po ploche detektora počas doby 7 minút v turbulencii aj bez nej.



Obrázek 2: Poloha interferenčného maxima na detekčnej ploche CCD kamery bez prítomnosti turbulencie (vľavo), s turbulenciou (vpravo)

Pre hodnoty vynesené do grafu bola určená spojnice trendov a následne boli vypočítané odchýlky skutočných hodnôt od tejto spojnice. Z vypočítaných odchýliek boli vytvorené histogramy v ktorých sú viditeľné charakteristické rozdelenia hustoty pravdepodobnosti.



Obrázek 3: Histogramy odchýliek skutočnej súradnice Y od spojnice trendov

Pri detekcií bez prítomnosti tepelných turbulencií pozorujeme pohyb maxima najmä v smere osi X. Môžeme dedukovať, že tento jav je spôsobený mechanickými vibráciami budovy. Avšak za prítomnosti tepelných turbulencií pozorujeme výrazné odchýlky v smere osi Y. Superpozíciou mechanických a tepelných vplyvov dochádza k zväčšeniu plochy výskytu maxima optického výkonu.

6 ZÁVER

V pokračovaní tejto práce bude bližšie preskúmaná a špecifikovaná distribučná funkcia odchýliek pre rôzne intenzity turbulencií. CCD kamerou so softwarom BeamGage je možné detailnejšie preskúmať konkrétne miesto na prijímacej ploche. Umožňuje zaznamenávať rýchle zmeny optického výkonu v čase v jednotlivých pixeloch. Výsledkom tejto diplomovej práce bude metóda pre určenie miery ovplyvnenia optického signálu turbulentným prostredím. Poznatky tohto výskumu môžu prispieť k vývoju nových korekčných metód u plne optických systémov.

REFERENCE

- [1] Esmail, M. A.: Investigation and Demonstration of High Speed Full-Optical Hybrid FSO/Fiber Communication System Under Light Sand Storm Condition. Photonics Journal, IEEE [online]. USA: IEEE, 2017, 9(1), 1-12 [cit. 2019- 01-19]. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2641741.
- [2] Rayleigh scattering In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 1.11.2001 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleighscattering>>.
- [3] Andrews, L. C., Phillips R. L.: Laser beam propagation through random media. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998, 433 s. ISBN 0-8194-2787-X.
- [4] Barcik, P., Hudcova, L., Wilfert, O.: Influence of the atmospheric turbulence on the laser beam [online]. IEEE, 2013, 83-86 [cit. 2019-01-07], ISBN 978-1-4673-5823-1. z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6582872/>>.